预计平均热感觉指数 PMV 计算模型的分析与改进

柳光磊[1,2],刘何清[1],欧聪颖[1],吴世先[1],吴国珊[1]

(1. 湖南科技大学资源环境与安全工程学院,411201 湘潭;2. 兴义民族师范学院物理与工程技术学院,562400 兴义)

摘　要:环境热舒适是衡量建筑物等级的重要指标。据大量实验与现场研究表明,PMV 热舒适模型存在一定的偏差,有待完善、改进。现有 PMV 计算模型计算的各散热项、热负荷、PMV 值与实际存在偏差;适用于 PMV 评价模型"接近热中性"环境条件、人体热负荷定义及其计算方法还存在异议。通过理论分析,本研究提出了新的"接近热中性"环境条件、新的人体热负荷定义及其计算方法,提出了新的 PMV 计算模型,并经对比分析发现,新的模型修正了在偏热环境下的现有 PMV 预测偏差。另一方面,在新的热负荷计算方法下,PMV 与热负荷之间的函数关系 K_M 必须进行相应调整,要获得准确的 K_M 函数关系,必须获得较准确的人体平均皮肤温度与环境参数间的关系。

关键词:PMV 计算模型;热中性;接近热中性;热负荷;热舒适;散热

中图分类号:TU111　　**文献标志码**:A

Analysis and improvement of the predicted mean thermal sensation index PMV calculation model

LIU Guanglei[1,2], LIU Heqing[1], OU Congying[1], WU Shixian[1], WU Guoshan[1]

(1. School of Resources, Environment and Safety Engineering, Hunan University of Science and Technology, 411201 Xiangtan, China;
2. College of Physics and Engineering Technology, Xingyi Normal University for Nationalities, 562400 Xingyi, China)

Abstract: Environmental thermal comfort is an important index to measure the grade of buildings. According to a large number of experiments and field studies, the PMV thermal comfort model still needs to be improved There is a certain deviation between the heat dissipation terms, heat load and PMV value calculated by the existing PMV calculation model and the actual value; There are still some objections to the definition of human thermal load and the calculation method of the environmental conditions of "near thermal neutrality" suitable for PMV evaluation model. Through theoretical analysis, this paper puts forward a new "near thermoneutrality" environmental condition, a new definition of human thermal load and its calculation method, and proposes a new PMV calculation model. Through comparative analysis, it is found that the new model corrects the existing deviation of PMV prediction in the hot environment. On the other

收稿日期:2021-04-14　　**修回日期**:2022-03-16

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 51864014;51704110)

通信作者:刘何清,教授。E-mail:hqliu8222638@163.com

引用格式:柳光磊,刘何清,欧聪颖,等. 预计平均热感觉指数 PMV 计算模型的分析与改进[J]. 应用力学学报,2022,39(3):588-597.

LIU Guanglei, LIU Heqing, OU Congying, et al. Analysis and improvement of the predicted mean thermal sensation index PMV calculation model[J]. Chinese journal of applied mechanics, 2022, 39(3):588-597.

hand, under the new thermal load calculation method, the functional relation (K_M) between PMV and thermal load must be adjusted accordingly. In order to obtain an accurate functional relation (K_M), a more accurate relation between average human skin temperature and environmental parameters must be obtained.

Key words: PMV calculation model; thermal neutral; near thermal neutrality; heat load; thermal comfort; heat dissipation

预计平均热感觉指数 PMV (predicted mean vote) 是由丹麦技术大学的 P. O. Fanger 教授基于人体热平衡理论和大量的真人实验总结得出的数学模型，是目前影响最全面、应用最广泛的室内热环境评价指标。世界权威标准组织均把预计平均热感觉指数 PMV 作为建筑物室内环境热舒适的评价指标，并认为 PMV = 0 的室内环境是最舒适的，是室内环境控制的最高标准[1-4]。

但国内外众多学者通过大量实验研究与现场研究发现，PMV 模型用于热舒适评价存在一定的偏差。Doherty 等[5]研究结果表明，在温暖的气候中，预测的和实际的热感觉之间存在差异。Parsons[6]研究发现，在温暖环境中预测的和实际的热感觉投票之间存在 0.5 个尺度单位的差异。Humphreys 等[7]研究表明，当偏离中性条件时，模型的误差往往会增加。Zhang 等[8]对我国热湿地区自然通风分离式空调建筑进行了研究，发现 PMV 模型高估了居民在热湿环境下的热感觉。Sanyogita 等[9]基于印度 5 个不同气候区的野外数据，提出了一种自适应热舒适模型，并认为在温暖气候下，PMV 模型高估了居住在空调建筑中的人的热感觉。Wu 等[10]对长沙 11 栋分体空调办公建筑进行了实地研究，结果表明，居民接受的温度高于 PMV 模型预测的温度。

基于 PMV 模型预测热感觉存在偏差，很多学者为修正 PMV 模型进行了大量的研究。Evandro 等[11]认为 PMV 模型对热舒适性评价与人的真实热感觉相比存在偏差的原因是服装表面温度(t_{cl})导致的，用牛顿迭代法求解t_{cl}值，再把t_{cl}值代入 PMV 模型进行计算，并用实验验证了该方法的准确性。Syed 等[12]通过实验研究得出的“平均血压”和“活动水平”之间的关系来修正 PMV 模型。自适应 PMV (aPMV) 模型是为了实现 PMV 模型的热适应效应而提出的扩展模型。在这类模型中，经验系数(称为“自适应系数”)通过对实验结果应用最小二乘法来确定，近年来，人们对 aPMV 模型的性能进行了大量研究[13-16]。

基于以上的分析，PMV 模型在评估温暖环境中的热感觉存在偏差，部分原因是对体温调节性出汗的简单处理(固定了皮肤平均温度)造成的，这个简单处理对 PMV 方程中皮肤扩散蒸发散热量、潜热散热量、对流散热量、辐射散热量的计算产生了影响，造成冷、热两端均出现计算热负荷的绝对量较实际发生偏离，从而致使 PMV 绝对值较实际有一定的偏差。当热环境偏离“热中性”环境较大时，平均皮肤温度无法满足 Fanger 所提出的平均皮肤温度计算公式，计算出的 PMV 值与实际热感觉投票值有一定的差异。

本研究旨在通过对 Fanger 的 PMV 热舒适模型进行研究分析，针对 PMV 计算模型的“接近热中性”环境条件及其“人体热负荷”的理解上存在的异议，提出新的见解，并改进 PMV 计算模型，使之预测更加准确，适用性更加广泛，更有效地推动 PMV 热舒适模型的应用。

1 Fanger 建立的 PMV 热舒适计算模型

1.1 热舒适方程

Fanger 于 1970 年提出了描述着装人体在稳态条件下能量平衡的热舒适性方程，即

$$M-W-3.05[5.733-0.007(M-W)-p_a]-0.42(M-W-58.15)-0.0173M(5.867-p_a)-0.0014M(34-t_a)=(t_{sk}-t_{cl})/0.155I_{cl}=f_{cl}h_c(t_{cl}-t_a)+3.96\times10^{-8}f_{cl}[(t_{cl}+273)^4-(\bar{t}_r+273)^4] \quad (1)$$

式中：M 为活动量(能量代谢率)，W/m^2；W 为人体对外所做的机械功，W/m^2；p_a为人体周围空气中的水蒸汽分压力，kPa；t_a为人体周围空气温度，℃；t_{sk}为人体在接近舒适条件下的平均皮肤温度，℃；t_{cl}为着装人体外表平均温度，℃；I_{cl}为成套服装热阻，m^2·℃/W；f_{cl}为服装面积系数，是着装的人体表面积与裸体表面积之比；h_c为人体外表与环境的对流换热系数，W/(m^2·℃)；t_{cl}为着装人体外表平均温度，℃；$\bar{t}_r$为环境的平均辐射温度，℃。

Fanger 热舒适方程反映的是人体处于最佳热舒适状态下的产热量与散热量之间的热平衡，是指活动量稳定的人体、处在参数稳定的环境、进行稳定的热交换情况下的热平衡。Fanger“热中性”状态是指能使 Fanger 热舒适方程成立的环境参数组合。关于 Fanger 热舒适方程成立的条件，在不同的资料中描述相近[17-20]，代表性地描述：第一，人体必须处于热平衡状态，且人体蓄热量为 0；第二，皮肤平均温度应具有与舒适相适应的水平；第三，为了舒适，人体应具有最佳的排汗率。其中：舒适的皮肤平均温度必须满足 $t_{sk}=35.7-0.0275(M-W)$ 关系，舒适的人体最佳排汗散热量必须满足 $E_{rsw}=0.42(M-W-58.2)$ 关系。只有同时满足上述 3 个条件的环境参数组合，才会使人体处于最佳热舒适状态，此环境参数组合，即为 Fanger“热中性”状态。

通过上述 3 个条件可知，不同的活动强度对应不同的平均皮肤温度及排汗散热量，不同的活动强度对应不同的“热中性”状态。换言之，在一定着装条件下，任何一种活动强度都存在一组对应的环境参数组合，能使人体处于最佳热舒适状态，而其他环境参数组合则被称为“偏离热中性”平衡状态。其中，“偏离热中性”平衡状态的热环境，上述第二、三个条件不一定满足。

Fanger 热舒适方程的建立，明确了人体在什么条件下才能达到相对“热最舒适”状态，为人类评价生产、生活环境的热舒适性提供了科学依据与参照标准。

1.2 PMV 热舒适计算模型

Fanger 建立热舒适方程的作用不仅仅是为了明确人体在什么条件下才能达到相对“最佳热舒适”状态，更重要的是基于热舒适方程确定的“最佳热舒适状态”评价现实环境的热舒适性。Fanger 建立了用于评价环境热舒适性的预计平均热感觉指数 PMV 评价模型与评价指标[21]，其实质是将人的热舒适感觉定量化，然后，用此定量化的指标去评价其他新设计环境的热舒适性。

Fanger 收集了 1 396 名美国和丹麦受试者在室内参数稳定的人工气候室内适应 3h 以后的投票结果，得出人的热感觉与人体热负荷 L 之间关系的实验回归公式，即

$$PMV=[0.303\exp(-0.036M)+0.0275]L \quad (2)$$

其中人体热负荷 L 的定义为人体产热量与人体向外界散出的热量之间的差值，但这里有个假定，即人体的平均皮肤温度 t_{sk} 和出汗造成的潜热散热 E_{rsw} 是人体保持舒适条件下的数值。因此可以看出，人体热负荷 L 即人体热平衡方程中的蓄热率 S，即把蓄热率看作是造成人体不舒适的热负荷。

Fanger 基于热舒适方程和人的热感觉与人体热负荷之间关系的实验回归公式建立了预计平均热感觉指数 PMV 评价模型[21]，其数学表达式如下。

$$\frac{PMV}{0.303\exp(-0.036M)+0.0275}=M-W-3.05[5.733-0.007(M-W)-p_a]-0.42(M-W-58.15)-0.0173M(5.867-p_a)-0.0014M(34-t_a)-f_{cl}h_c(t_{cl}-t_a)+3.96\times10^{-8}f_{cl}[(t_{cl}+273)^4-(\bar{t}_r+273)^4] \quad (3)$$

式(3)的等号右边即为某环境状态偏离 Fanger“热中性”状态的“热负荷”表达式。

2 PMV 热舒适计算模型的分析与改进

2.1 PMV 热舒适评价模型的分析

2.1.1 “接近热中性”环境条件

PMV 热舒适评价模型建立的目的是为了科学的评价某环境参数组合下的人体热舒适性。但由于环境参数范围较大，不可能每种环境参数组合都能使人体感觉到热舒适，只有很窄范围的环境参数组合才有可能使人体感觉到热舒适或接近热舒适，其他范围的环境参数会使人体不舒适甚至无法忍受。因此，Fanger 提出的预计平均热感觉指数 PMV 评价模型不可能预测各种参数组合环境的热舒适性，而只是考虑对“接近热中性”的环境进行热舒适性评价。

现有文献中对“接近热中性环境”的代表性描述为[17]：第一，“接近热中性环境”参数下，人体平均皮肤温度与新陈代谢率之间满足 $t_{sk}=35.7-0.0275\times(M-W)$ 线性关系，人体排汗散热量与新陈代谢率之间满足 $t_{sk}=35.7-0.0275(M-W)$ 线性关系；第二，除“热中性”环境条件以外的其他环境参数条件。没有强调人体必须处于蓄热率为 0 的热平衡状态。

笔者在阅读大量相关文献的基础上总结、分析认为“接近热中性”环境条件应包括：第一，除“热中性”条件以外的其他环境参数条件；第二，人体自身

调节能力能够调节到产热等于散热的新的无蓄热平衡状态的环境参数条件;第三,一定活动强度下,能保持人的新陈代谢率基本稳定的环境参数条件。理由如下。

1)由于“接近热中性”条件的环境参数偏离了 Fanger 热舒适方程确定的“热中性”环境条件,假设该“接近热中性”环境是由“热中性”环境改变而来,在环境参数改变的初期,新的环境处于过渡的不稳定状态,人体由于环境参数的改变,打破原有的“热中性”平衡,进入产热与散热的不平衡时期,体内短时间存在蓄热或失热;但随时间的延长,在人体调节机能的作用下,人体与环境必将重新恢复到新的产热、散热平衡状态,恢复到新的无蓄热,即蓄热量为 0 的热平衡状态,否则,将影响健康。又根据 PMV 指标的来源[21]可知,其评价的是新的稳定热平衡时期的环境舒适性,而不是热不平衡的过渡时期的环境热舒适性。因此,提出了上述“第二个条件”。

2)由于人体具有一定的热调节能力,当环境温度降低,皮肤毛细血管收缩,血流减少,皮肤温度下降以减少散热量;当环境温度上升,皮肤血管扩张,血流增多,皮肤温度升高以增加散热量,甚至大量排汗以加大蒸发散热量,达到人体热平衡。如图 1 所示,该图反映环境温度对新陈代谢率的影响;其将人体新陈代谢率变化分为上下适应温度界限、上下临界温度界限。根据这两个界限将人的新陈代谢率分为新陈代谢率稳定区(CE)、低温代谢率下降区(BC)和高温代谢率增长区(EF)。

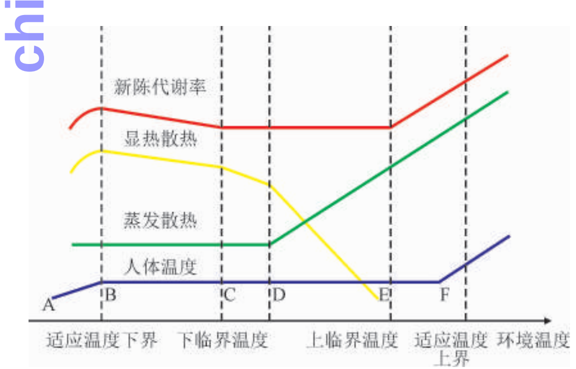


图 1 新陈代谢[20,22]

Fig. 1 Metabolism diagram[20,22]

当人体处于低温代谢率下降区(BC)时,将通过冷颤等肌肉收缩的冷应激方式提高机体的代谢率,以应对体温的降低,当机体通过频繁肌肉收缩等方式仍无法抵偿环境热损失,体温将继续降低,当体温低于一定水平,人将生病。因此,处于低温代谢率下降区(BC)的环境不能划入“接近热中性”环境。

当人体处于高温代谢率增长区(EF)时,人体主要靠大量出汗来增加机体散热量,以应对体温的上升,当出汗已不能阻止体温继续上升时,人也将生病。因此,处于高温代谢率增长区(EF)的环境也不能划入“接近热中性”环境。

只有新陈代谢率稳定的区(CE),人体通过皮肤毛细血管收缩或少量出汗即可维持体温在健康的生理水平。因此,将“一定的活动强度下,能保持人的新陈代谢率基本稳定的环境参数条件”作为“接近热中性”环境的限定条件之一。

3)由图 1 可知,新陈代谢率可在一个温度区间(CE)内稳定,若“人体平均皮肤温度、排汗散热量与新陈代谢率之间存在上述线性关系”,则在 CE 区间内人体平均皮肤温度和排汗散热量为定值,显然与实际不符。因为,不同新陈代谢率下,CE 区间内只有一个状态环境的温度满足 Fanger 的“热中性”状态,满足“人体平均皮肤温度、排汗散热量与新陈代谢率之间存在上述线性关系”,其他状态均不满足。实验表明,人体平均皮肤温度受许多因素影响,而不仅仅是新陈代谢率[23]。因此,不能将“人体平均皮肤温度、排汗散热量与新陈代谢率之间线性关系”作为“接近热中性环境”的条件。

2.1.2 “接近热中性环境”条件下的人体热负荷

关于“接近热中性”条件下的人体热负荷的描述有多种。如:人体产热量与假定人体保持舒适条件下的平均皮肤温度和出汗造成的潜热散热之间的差值[17]。在一定活动量下,为了保持皮肤平均温度及皮肤蒸发散热量在舒适范围内时,人体体内的产热与对环境的散热之差值为人体热负荷[19]。给定热环境下,人体处于一定运动水平时的实际散热量和达到最佳舒适(热中性)所需的散热量的差值[24]。

综合上述几种描述,都归结到一点:给定热环境下,假定人体保持舒适条件下的平均皮肤温度和出汗造成的潜热散热时,人体内部产热量和散热量之差,即是人体热负荷[25]。强调的是:在“接近热中性”环境中,人体产热量与“热中性”状态下的散热量之差值。

而根据第 2.1.1 节关于“接近热中性”条件的分析可知,环境参数偏离“热中性”舒适条件越远,人体热不舒适程度越大,环境给人体的调节机能造成的热负荷就越重,达到新的热平衡机体付出的努力越大,这种相对于“热中性”舒适条件人体调节机能

将人体调节到新的无蓄热、稳定热平衡状态时需要调节的热量被称为“接近热中性”条件下的人体热负荷(即人体从“热中性平衡”调节到“新的无蓄热、稳定热平衡”,人体需要调节的热量)。再根据本研究提出的“接近热中性”条件的第 3 个条件可知,此处所谓“需要调节的热量”是指人体为了达到新的无蓄热、稳定热平衡时显热散热、潜热散热的变化量。理由如下。

1)“接近热中性”条件环境温度范围内,人体新陈代谢率主要决定于活动强度;一定活动强度下,人体新陈代谢率近似为常数,即产热量基本稳定。

2)在人体稳态热平衡条件下,人体散热主要由显热散热与潜热散热组成,且在新陈代谢率不变的环境温度范围内,随着环境空气温度升高,显热散热量逐渐减小,潜热散热量逐渐增加,但无论如何,均存在人体显热散热量与潜热散热量之和等于人体新陈代谢率,如表 1 和图 1 所示。换言之,显热增加(减小)量等于潜热减小(增加)量。

3)PMV 指标是用于评价“热中性”稳态环境与“接近热中性”稳态环境的热舒适性。因此,如果仅限定在“热中性”或“接近热中性”环境内的产热与散热量之差值,基于第 2)条热平衡条件下的产热与散热的关系,差值为 0。

4)PMV 指标是用于评价固定活动量下不同环境的热舒适性,不论是“热中性”环境,还是“接近热中性”环境,人体的新陈代谢率是基本不变的,总的散热量也是不变的。如果以“热中性”环境的散热量作为基准去求“接近热中性”环境的散热量的差值,仍然是 0。

本研究认为,正是这 4 个方面理由,Fanger 才将皮肤温度及出汗蒸发散热量的计算限定,人为造成一个“产热”与“散热”的差值。

由于式(3)固定了在人体活动量不变的情况下,任何“接近热中性”条件的人体平均皮肤温度和出汗引起的潜热散热量均等于 Fanger 热舒适方程确定的“热中性”环境条件下的人体热最舒适时的平均皮肤温度和出汗引起的潜热散热量大小,不能反映“接近热中性条件”下人体潜热散热真实值;且由于固定了人体平均皮肤温度,其中人体对流散热项、辐射散热项及皮肤扩散蒸发散热项也不能反映“接近热中性条件”下的真实大小,人为制造了一个“产热量与散热量”间的差值。

表 1　成年男子在不同环境温度条件下的散热量[26](单位:W)

Tab. 1　Heat dissipation of adult men under different ambient temperature conditions[26] (unit:W)

活动强度	散热类型	$t_a=20$ ℃	$t_a=21$ ℃	$t_a=22$ ℃	$t_a=23$ ℃	$t_a=24$ ℃	$t_a=25$ ℃	$t_a=26$ ℃	$t_a=27$ ℃	$t_a=28$ ℃	$t_a=29$ ℃	$t_a=30$ ℃
静坐	显热	84	81	78	74	71	67	63	58	53	48	43
	潜热	26	27	30	34	37	41	45	50	55	60	65
	合计	108	108	108	108	108	108	108	108	108	108	108
极轻劳动	显热	90	85	79	75	70	65	61	57	51	45	41
	潜热	47	51	56	59	64	69	73	77	83	89	93
	合计	137	136	135	134	134	134	134	134	134	134	134
轻度劳动	显热	93	87	81	76	70	64	58	51	47	40	35
	潜热	90	94	100	106	112	117	123	130	135	142	147
	合计	183	181	181	182	182	181	181	181	182	182	182
中度劳动	显热	117	112	104	97	88	83	74	67	61	52	45
	潜热	118	123	131	138	147	152	161	168	174	183	190
	合计	235	235	235	235	235	235	235	235	235	235	235
重度劳动	显热	169	163	157	151	145	140	134	128	122	116	110
	潜热	238	244	250	256	262	267	273	279	285	291	297
	合计	407	407	407	407	407	407	407	407	407	407	407

设 $K_M=0.303\exp(-0.036M)+0.0275$,则式(3)可变为如下形式。

$$\frac{PMV}{K_M}=M-W-3.05[5.733-0.007(M-W)-p_a]-0.42(M-W-58.15)-0.0173M(5.867-p_a)-0.0014M(34-t_a)-f_{cl}h_c(t_{cl}-t_a)+3.96\times10^{-8}f_{cl}\cdot[(t_{cl}+273)^4-(\bar{t}_r+273)^4] \tag{4}$$

下面逐项分析$(M-W)$不变、环境参数发生变化时式(4)中各散热项的变化。

1)皮肤扩散蒸发散热量项($E_{dif}=3.05[5.733-$

$0.007(M-W)-p_a])$

从表达式可以看出,热端(环境参数由 PMV =0 向 PMV =3 方向变化时)随环境水蒸气分压力的增加而减小;冷端(环境参数由 PMV =0 向 PMV = -3 方向变化时)随环境水蒸气分压力的减小而增大。此现象是由于固定了皮肤平均温度($t_{sk}=35.7-0.0275(M-W)$)得出的结果,且只表现出与环境水蒸气分压力有关。

但实际上,$E_{dif}=3.05[5.733-0.007(M-W)-p_a]$,其除了与环境水蒸气分压力有关外,还与皮肤平均温度有关。当环境温度升高,皮肤温度升高;环境温度降低,皮肤温度相应降低。因此,$E_{dif}=3.05\times[5.733-0.007(M-W)-p_a]$不能真实反映环境参数变化引起的皮肤扩散蒸发散热量的变化。

如果考虑皮肤温度随环境温度变化时,当环境由"热中性"环境(PMV =0)变化到偏热的"接近热中性"环境,则对应环境参数下实际皮肤扩散蒸发散热量较 Fanger 计算式的计算值要大;当环境由"热中性"环境(PMV =0)变化到偏冷的"接近热中性"环境,则对应环境参数下实际皮肤扩散蒸发散热量较 Fanger 计算式的计算值要小。说明按 Fanger 计算式计算时,该项会造成 PMV 计算值的绝对值偏大。

2)出汗造成的潜热散热量项($E_{rsw}=0.42(M-W-58.15)$)

在 Fanger 计算式中该项被固定。但根据人体生理特征可知,实际上,热端随环境温度增加而增加,冷端却随环境温度降低而减小。

由于式(4)计算时将该蒸发散热量项固定,致使热端计入量偏小,造成热负荷正向偏大;冷端计入量偏大,又造成热负荷(绝对值)负向偏大,致使 PMV 在正负双向均较实际计算值的绝对值偏大。

3)呼吸潜热散热量项($E_{res}=0.0173M(5.867-p_a)$)

从该表达式可以看出,热端随环境水蒸气分压力的增加而减小,冷端随环境水蒸气分压力的减小而增大,只表现出与环境水蒸气分压力有关。

此项相对较准确反映由"热中性"环境转变为"接近热中性"环境时人体需要调节的呼吸潜热散热量的大小,较准确反映其对 PMV 计算值的贡献。

4)呼吸显热散热量项($C_{res}=0.0014M(34-t_a)$)

此项能较真实反映呼吸显热散热量的变化量,反映其对 PMV 值变化的贡献。

5)人体外表面对流散热量项($C=f_{cl}h_c(t_{cl}-t_a)$)与辐射散热量项($R=3.96\times10^{-8}f_{cl}[(t_{cl}+273)^4-(\bar{t}_r+273)^4]$)

辐射散热和对流散热中的服装外表面温度的计算式为:$t_{cl}=t_{sk}-I_{cl}(R+C)$,其中皮肤温度$t_{sk}$在 Fanger 的计算式中被固定,而实际上人体皮肤温度随环境温度上升而增加、随环境温度降低而减小。因此,采用 Fanger 的计算式的辐射与对流散热量:热端会较实际值偏小,冷端又会比实际值偏大。致使采用 Fanger 的计算式计算的 PMV 值的绝对值较实际偏大。

综合对各散热量项的分析,当环境由"热中性"环境(PMV =0)变化到"接近热中性"环境,按Fanger 提出的"皮肤平均温度、显性出汗蒸发散热量只与人的活动量有关"限定条件,除呼吸散热项基本不受环境温度影响外,其他各项计算值均较实际散热量存在偏差,造成正负两向的计算热负荷的绝对值均较实际偏大,致使 PMV 值的绝对值较实际偏大。

因此,本研究将"接近热中性条件下的人体热负荷"定义为:基于"热中性"热平衡转变到新的无蓄热、稳定热平衡状态时,人体调节机能需要调节的显热量或潜热量,即人体由"热中性"环境热平衡转变到新的无蓄热、稳定热平衡状态时的显热散热或者潜热散热的变化量。

式(4)中的"人体热负荷",是在"限定了潜热部分的出汗散热量、同时又限定了人体平均皮肤温度的变化及其产生的显热量的变化量大小"基础上,产热量与假定条件下的散热量之差值。其既计入了部分潜热散热量的变化量,又计入了部分显热散热量的变化量得来的,存在潜热散热与显热散热混淆现象。

基于本研究提出的"接近热中性条件"和"人体热负荷"定义,"接近热中性条件下的人体热负荷"为人体由"热中性"热平衡转变到新的无蓄热、稳定热平衡状态时的显热散热变化量、潜热散热变化量。即:要么只计算由"热中性"状态变化到"接近热中性"状态的潜热散热变化量,要么只计算显热散热变化量。本研究采用"显热"散热型式,即潜热散热项始终固定采用 Fanger"热中性"状态时的值,而显热散热项按预测热环境实际情况进行计算,即

$L=M-W-3.05[5.733-0.007(M-W)-p_{a0}]-0.42(M-W-58.15)-0.0173M(5.867-p_{a0})-$

$0.0014M(34-t_{ai})-f_{cl}h_c(t_{cli}-t_a)+3.96\times10^{-8}f_{cl}\cdot[(t_{cli}+273)^4-(\bar{t}_{ri}+273)^4]$ (5)

由于辐射散热和对流散热中的服装外表面温度受人体外表面对流显热量和辐射散热量的影响,需要迭代计算,求解困难。而人体皮肤平均温度相对容易获得,根据文献[13],可将辐射、对流散热项进行如下变换与简化。

$$R+C=h_{cr}(t_{sk}-t_a)F_{cle}=f_{cl}h_{cr}(t_{sk}-t_0)F_{cl} \quad (6)$$

式中:h_{cr}为着装人体外表面综合显热换热系数,$h_{cr}=0.69h_r+h_c$,W/(m²·℃);h_r为称线性辐射换热系数,$h_r=4\sigma(T_{cl}+T_r/2)^3$,W/(m²·K),在常温下,$h_r$近似为5.7W/(m²·K)[20],这里取$h_r=5.7$ W/(m²·K)进行计算;T_{cl}为服装外表面平均温度,K;T_r为环境平均辐射温度,K。t_0为折算温度,$t_0=\frac{0.69h_rt_r+h_ct_a}{0.69h_r+h_c}$,℃;$F_{cle}$为服装有效传热效率,$F_{cle}=\frac{f_{cl}}{1+0.155h_{cr}f_{cl}I_{cl}}$,$F_{cle}=f_{cl}F_{cl}$;$F_{cl}$为服装基本传热效率。

将式(6)代入式(5),可简化为

$$L=M-W-3.05[5.733-0.007(M-W)-p_{a0}]-0.42(M-W-58.15)-0.0173M(5.867-p_{a0})-0.0014M(34-t_{ai})-f_{cl}h_{cr}(t_{ski}-t_{0i})F_{cl} \quad (7)$$

式中:末尾下标"i"对应的环境参数为"接近热中性"状态时的参数,末尾下标"0"对应的环境参数为Fanger"热中性"状态时的参数。

2.2 PMV 热舒适计算模型的改进

将本研究提出的"热负荷"式(7)代入式(4),即可得出新的 PMV 计算模型,即

$$\frac{PMV}{K_M}=M-W-3.05[5.733-0.007(M-W)-p_{a0}]-0.42(M-W-58.15)-0.0173M(5.867-p_{a0})-0.0014M(34-t_{ai})-f_{cl}h_{cr}(t_{ski}-t_{0i})F_{cl} \quad (8)$$

但根据 Fanger 获得 PMV 计算模型的推导过程可知:Fanger 提出的 PMV 计算模型中的 K_M 项是基于 Fanger 提出的热负荷计算方法及 1 396 个受试者的热感觉投票结果分析得出的,故式(8)中的 K_M 项必须根据新的"热负荷"计算方法重新进行拟合。

根据 Fanger 获得 PMV 计算模型的推导过程,新的 K_M计算模型的拟合过程如下。

1)已知 Fanger 经过对 1 396 个受试者的热感觉投票结果分析得出的人体热舒适感 PMV 与环境温度 t_a($t_a=t_r$)之间的关系,见表 2。

2)建立新的"人体热负荷"与环境温度间的关系。

先将人体热负荷 L 计算式(8)中不随环境温度变化的项用符号 G 表示,即

$$G=M-W-3.05[5.733-0.007(M-W)-p_{a0}]-0.42(M-W-58.15)-0.0173M(5.867-p_{a0}) \quad (9)$$

则式(7)可改写为

$$L=G-0.0014M(34-t_{ai})-f_{cl}h_{cr}(t_{ski}-t_{0i})F_{cl} \quad (10)$$

表 2 1 396 个受试者的热感觉 PMV 与环境温度间的关系及相应∂PMV/∂L[18]

Tab. 2 The relationship between thermal sensation PMV and ambient temperature of 1 396 subjects and the corresponding ∂PMV/∂L[18]

活动量	M/(W·m⁻²)	I_{cl}/clo	V/(m·s⁻¹)	平均投票 PMV (ϕ=50%,t_a/℃)	∂PMV/∂L
坐	58	0.6	0.1	$PMV=-8.471+0.331t_a$	0.080
低	93	0.6	0.2	$PMV=-3.643+0.175t_a$	0.038
中	123	0.6	0.25	$PMV=-3.356+0.174t_a$	0.036
高	157	0.6	0.32	$PMV=-4.158+0.265t_a$	0.053

式(10)中的人体平均皮肤温度随环境温度的变化而改变,但目前没有完整的人体平均皮肤温度预测公式,只在文献[23]中报道了"温热环境"下(实验测试条件范围包括:平均皮肤温度(33~38℃)、气温(23~50℃)、饱和水蒸气压(1.0~4.8 kPa)、气流速度为(0.2~0.9 m/s)、新陈代谢率(50~270 W/m²)、服装热阻(0.1~0.6 clo))的人体平均皮肤温度的预测式为

$$t_{ski}=30.0+0.138t_{ai}+0.254p_{aib}-0.57v+1.28\times10-3M-0.553I_{cl} \quad (11)$$

式中:p_{aib}为对应环境干球温度t_{ai}的饱和水蒸气分压力,kPa;v 为环境风速,m/s。

饱和水蒸气压与环境温度间的线性函数关系为

$$p_{aib}=0.167t_{ai}-0.9244 \quad (12)$$

先将式(10)~式(12)联立,再将式(10)不随环境温度变化的项用符号 H 表示,整理得

$$L = G - 0.0014M(34 - t_{ai}) - f_{cl}h_{cr}(H - 0.82\,t_{ai})F_{cl} \quad (13)$$

由式(13)得出环境温度与人体热负荷之间的函数关系为

$$t_{ai} = (L - G + 0.0476M + f_{cl}h_{cr}H\,F_{cl})/(0.0014M + 0.82\,f_{cl}h_{cr}F_{cl}) \quad (14)$$

3)新的 K_M 计算模型拟合

将式(14)代入表 2 中不同活动强度下对应的 PMV-t_a 关系式中,同时将表 2 中实验时对应的基础数据代入,求出 ∂PMV/∂L 值,并描点在以 ∂PMV/∂L 纵坐标、新陈代谢率 M 为横坐标的坐标系内。然后,用 Origin 软件拟合 ∂PMV/∂L 值与 M 之间的函数关系曲线,如图 2 所示。

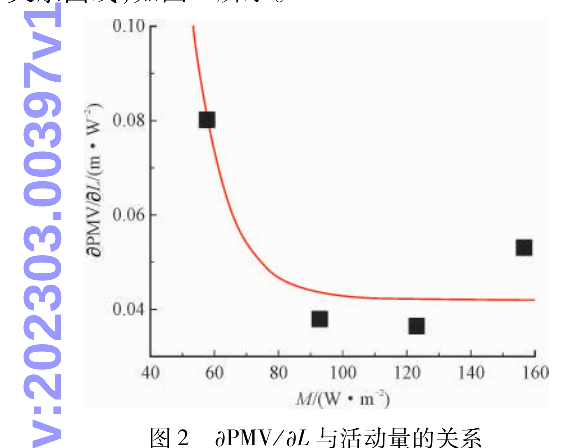


图 2 ∂PMV/∂L 与活动量的关系

Fig. 2 The relationship between ∂PMV/∂L and activity

拟合曲线的函数关系为($R^2 = 0.851$)

$$\partial PMV/\partial L = 0.042 + 8.902\exp(-0.094M) \quad (15)$$

将式(15)积分得

$$PMV = [0.042 + 8.902\exp(-0.094M)]L \quad (16)$$

因此,基于新提出的"接近热中性"状态及人体热负荷定义下的 K_M 为

$$K_M = 0.042 + 8.902\exp(-0.094M) \quad (17)$$

4)采用新 K_M 的 PMV 计算模型

将式(17)代入式(8)中,即得出基于新提出的"接近热中性"状态及人体热负荷定义下的 PMV 计算公式,即

$$PMV/[0.042 + 8.902\exp(-0.094M)] = M - W - 3.05[5.733 - 0.007(M - W) - p_{a0}] - 0.42(M - W - 58.15) - 0.0173M(5.867 - p_{a0}) - 0.0014M(34 - t_{ai}) - f_{cl}h_{cr}(t_{ski} - t_{0i})F_{cl} \quad (18)$$

$$PMV/(0.042 + 8.902\exp(-0.094M)) = M - W - 3.05[5.733 - 0.007(M - W) - p_{a0}] - 0.42(M - W - 58.15) - 0.0173M(5.867 - p_{a0}) - 0.0014M(34 - t_{ai}) - f_{cl}h_c(t_{cli} - t_a) + 3.96 \times 10 - 8f_{cl} \times [(t_{cli} + 273)^4 - (\bar{t}_{ri} + 273)^4] \quad (19)$$

3 公式验证

3.1 人体热负荷计算公式的验证

为了验证式(7)热负荷计算模型是否修正了式(3)中热负荷绝对值偏大的现象,以及式(5)和式(7)计算结果是否可信。将对式(7)与式(3)中Fanger 提出的热负荷计算式的计算结果进行对比分析。

对比分析方法:①先按 Fanger 提出的 PMV 计算式(3),分别计算出不同劳动强度下、PMV 为 −3、−2、−1、0、1、2、3 时对应的环境温湿度参数;②再基于不同环境参数条件,分别用本研究提出的热负荷计算式(7)和式(3)计算出热负荷值;③两种计算结果对比分析。

利用 Fanger 提出的 PMV 计算式(3)计算的不同 PMV 时的环境温湿度参数值如表 3 所示。对应环境参数下热负荷计算对比结果见图 3。

表 3 不同活动强度下 PMV 时的对应环境参数值($w = 0, t_r = t_a$)

Tab. 3 Environmental parameter values of PMV under different activity intensity ($w = 0, t_r = t_a$)

M/(W·m^{-2})	φ/%	t/℃							I_{cl}/clo	v/(m·s^{-1})
		PMV = −3	PMV = −2	PMV = −1	PMV = 0	PMV = 1	PMV = 2	PMV = 3		
58	50	17.129	20.086	22.985	25.825	28.605	31.326	33.987	0.6	0.1
93	50	8.801	13.509	18.101	22.573	26.921	31.141	35.230	0.6	0.2
123	50	3.115	8.770	14.277	19.628	24.813	29.826	34.660	0.6	0.25
157	50	−0.926	5.026	10.833	16.483	21.965	27.266	32.379	0.6	0.32

由图 3 可知,采用式(7)计算的热负荷值均较式(5)计算的热负荷值,在冷端偏大,在热端偏小,与前文分析一致,说明式(7)计算的热负荷修正了式(3)中热负荷冷端偏小、热端偏大的现象。在热端,

由于式(7)计算时蒸发散热比例较大,两计算式计算值偏差较大;在冷端,蒸发散热比例较小,差值较小,符合实际。

同时,为了验证式(3)计算 PMV 值时,其"正负两向绝对值均偏大"的结论,将本研究提出的"热负荷"计算式(7)代入式(3),其计算结果如表 4 所示。

由表 4 可知,按式(7)计算的热负荷代入 Fanger 提出的 PMV 计算式(3),计算结果明显向中间收敛,进一步说明理论分析得出的结论的合理性,说明 Fanger 提出的 PMV 预测模型式(3)在进行实际环境热舒适性评价时会存在误差,热冷两端的 PMV 预测值(绝对值)均较实际偏大。

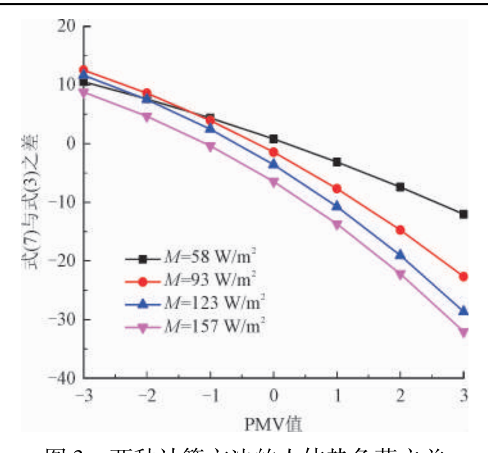


图 3　两种计算方法的人体热负荷之差

Fig. 3　The difference of human thermal load between the two methods

表 4　采用 Fanger 提出的式(3)与把热负荷式(7)代入式(3)的 PMV 计算结果对比

Tab. 4　Comparing the PMV calculation results by using formula (3) proposed by Fanger and substituting heat load formula (7) into formula (3)

计算方法	按式(3)计算				按式(7)代入式(3)计算			
$M/(W \cdot m^{-2})$	58	93	123	157	58	93	123	157
PMV 值	-3				-2.271	-2.490	-2.608	-2.722
	-2				-1.468	-1.646	-1.742	-1.844
	-1				-0.686	-0.828	-0.904	-0.992
	0				0.074	-0.041	-0.098	-0.171
	+1				0.811	0.717	0.674	0.618
	+2				1.526	1.441	1.410	1.370
	+3				2.218	2.132	2.106	2.084

3.2　新 PMV 方程的验证

为验证式(18)的可信度,将式(18)的计算结果与 Fanger 提出的 PMV 计算式(3)的计算结果进行对比分析。式(3)在推导过程中选用的人体平均皮肤温度与环境参数间的函数关系[23]仅适用温热环境中的热舒适评价,故本次验证分析仅对偏热环境的 PMV 预测进行对比分析。

对比验证方法:按 Fanger 提出的 PMV 计算式(3)计算出的不同劳动强度下 PMV 为 0、1、2、3 时对应的环境温湿度参数(见表 2)代入式(18)中,计算出对应的 PMV 值,计算对比结果见图 4。

由图 4 可知:在 Fanger 提出的热端热环境参数范围内计算结果吻合度较好,特别是较低劳动强度下,并与前文理论分析得出的结论基本一致;要获得准确的 K_M 系数,必须获得较准确的人体平均皮肤温度与环境参数间的关系;对比表 4 的计算结果,验证了 K_M 系数是需要根据"热负荷"的计算方法进行调整的。

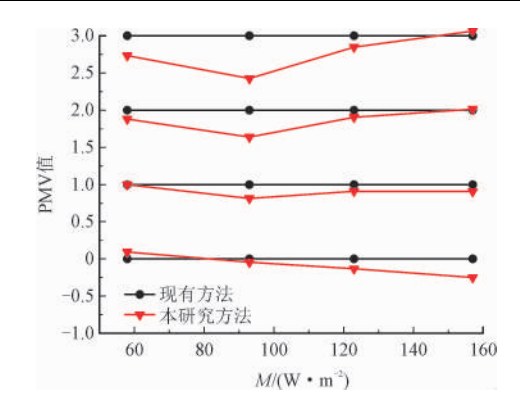


图 4　不同劳动强度两种计算方法计算的 PMV 值

Fig. 4　PMV values calculated by two calculation methods for different labor intensity

4　结　论

本研究对 PMV 计算模型进行了分析与探究,得出了以下结论。

1) Fanger 热舒适方程确定的热环境,称为"热中性"环境,是人体能达到的相对"热最舒适"环境,为

人类评价生产、生活环境的热舒适性提供了科学依据与参照标准。

2）经过 PMV 计算模型的分析，PMV 计算模型固定了 t_{sk}，对 PMV 方程中皮肤扩散蒸发散热量、潜热散热量、对流散热量、辐射散热量的计算产生了影响，造成冷、热两端均出现计算热负荷的绝对量较实际偏大现象，从而致使 PMV 绝对值较实际偏大。因此，当热环境偏离“热中性”环境较大时，t_{sk} 无法满足 Fanger 所提出的平均皮肤温度计算公式，计算出的 PMV 值与实际热感觉投票值相差较大。

3）本研究提出了新的“接近热中性”环境条件与人体热负荷定义，简化、完善了人体热负荷的计算方法，并在此基础上提出了新的 PMV 计算模型。新的 PMV 计算模型与现有 PMV 计算模型之间的偏差与理论分析基本一致，由于新的 PMV 计算模型中采用的 t_{sk} 公式适用范围有限，只适合用于偏热环境下的 PMV 预测，要获得准确的 K_M 函数关系，必须获得较准确的人体平均皮肤温度与环境参数间的关系。

参考文献

[1] AENOR. Ergonomics of the thermal environment—Analytical determination and Interpretation of thermal comfort using calculation of the PMV and PPD indices and local thermal comfort criteria: ISO7730-2005[S]. Geneva: International Organization for Standardization, 2005.

[2] SSPC. Thermal Environment Conditions for Human Occupancy : ASHRAE, ANSI/ASHRAE Standard 55-2010[S]. Atlanta, GA: American Society of Heating, Ventilating and Air-Conditioning Engineers, Inc. ,2011.

[3] 中华人民共和国建设部. 采暖通风与空气调节设计规范: GB 50019—2003[S]. 北京: 中国计划出版社, 2003.

[4] 中国标准化研究所. 民用建筑室内热湿环境评价标准: GB/T 5701—2008[S]. 北京: 中国标准出版社, 2008.

[5] DOHERTY T J, ARENS E. Evaluation of the physiological bases of thermal comfort models[J]. Ashrae transactions, 1988, 94(1): 1371-1385.

[6] PARSONS K C. The effects of gender, acclimation state, the opportunity to adjust clothing and physical disability on requirements for thermal comfort[J]. Energy & buildings, 2002, 34(6): 593-599.

[7] HUMPHREYS M A, NICOL J F. The validity of ISO-PMV for predicting comfort votes in every-day thermal environments[J]. Energy & buildings, 2002, 34(6): 667-684.

[8] ZHANG Y, CHEN H, WANG J, et al. Thermal comfort of people in the hot and humid area of China—impacts of season, climate, and thermal history[J]. Indoor Air, 2016, 26(5): 820-830.

[9] SANYOGITA M, YASH S, RAJAN R, et al. Field studies of thermal comfort across multiple climate zones for the subcontinent: India model for adaptive comfort (IMAC)[J]. Building and environment, 2016, 98: 55-70.

[10] WU Z B, LI N P, PAWEL W, et al. Field study on thermal comfort and energy saving potential in 11 split air-conditioned office buildings in Changsha, China[J]. Energy, 2019, 182: 471-482.

[11] EVANDRO E B, MORETO J A, XAVIER A A D P, et al. The approximation between thermal sensation votes (TSV) and predicted mean vote (PMV): A comparative analysis[J]. International journal of industrial ergonomics, 2019, 69: 1-8.

[12] SYED I G, MUHAMMAD H K, MUZAFFAR A. Revisiting Fanger's thermal comfort model using mean blood pressure as a bio-marker: An experimental investigation[J]. Applied thermal engineering, 2016, 109: 35-43.

[13] JOSÉ A O, OLIVEIRA A C. A new thermal comfort approach comparing adaptive and PMV models[J]. Renewable energy, 2010, 36(3): 951-956.

[14] WANG Z, XIA L, LU J. Development of Adaptive Prediction Mean Vote (APMV) model for the elderly in Guiyang, China[J]. Energy procedia, 2017, 142: 1848-1853.

[15] JEONG T K, JI H L, SUN H C, et al. Development of the adaptive PMV model for improving prediction performances[J]. Energy & buildings, 2015, 98: 100-105.

[16] ZHANG S, CHENG Y, FANG Z, et al. Improved algorithm for adaptive coefficient of Adaptive Predicted Mean Vote (APMV)[J]. Building and environment, 2019, 163: 106318. 1-106318. 7.

[17] 朱颖心. 建筑环境学[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2010.

[18] FANGER P O. Calculation of thermal comfort, introduction of a basic comfort equation[J]. Ashrae transactions, 1967, 73(2): 1-20.

[19] 魏润柏, 徐文华. 热环境[M]. 上海: 同济大学出版社, 1994.

[20] 李百战. 室内热环境与人体热舒适[M]. 重庆: 重庆大学出版社, 2012.

[21] FANGER P O. Thermal comfort[M]. Malabar: Krieger Publishing Company, 1982.

[22] 张国高. 高温生理与卫生[M]. 上海: 上海科学技术出版社, 1989.

[23] MAIRIAUX P, MALCHAIRE J, CANDAS V. Prediction of mean skin temperature in warm environments[J]. European journal of applied physiology and occupational physiology, 1987, 56(6): 686-692.

[24] 王海英, 胡松涛. 对 PMV 热舒适模型适用性的分析[J]. 建筑科学, 2009, 25(6): 108-114.
WANG Haiying, HU Songtao. Analysis on the applicability of PMV thermal comfort model[J]. Building science, 2009, 25(6): 108-114(in Chinese).

[25] 范存养. 热舒适评价指标 PMV 及其实际应用[J]. 暖通空调, 1993(3): 20-26.
FAN Cuiyang. Thermal comfort evaluation index PMV and its practical application[J]. Heating ventilating & air conditioning, 1993(3): 20-26(in Chinese).

[26] 井上宇市. 空气调节手册[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1986.

（编辑 张璐）